

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-043273

(43)Date of publication of application : 13.02.2003

(51)Int.Cl. G02B 6/12  
G02B 6/13

(21)Application number : 2001-227980

(71)Applicant : HITACHI CABLE LTD

(22)Date of filing : 27.07.2001

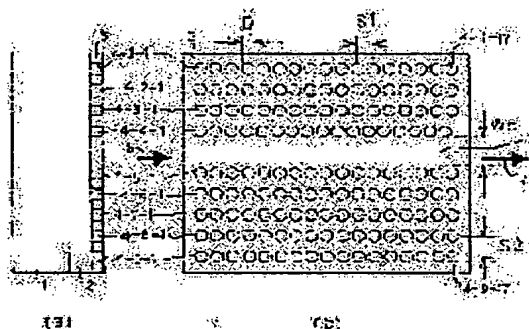
(72)Inventor : IMOTO KATSUYUKI

## (54) PHOTONIC CRYSTAL WAVEGUIDE AND METHOD FOR MANUFACTURING THE SAME

## (57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To provide a compact photonic crystal waveguide which is small and low in loss and to provide a method for manufacturing the waveguide.

**SOLUTION:** The refractive index of a region 5 which is not irradiated with a ultraviolet laser beam spot becomes relatively higher an a waveguide is formed by forming a lowered refractive index region 4 in a matrix pattern by making a part, which is not made into an optical path of a polymer layer for photo bleaching, directly irradiated with a lot of ultraviolet laser beam spots with prescribed spaces S1 and S2, thus a compact waveguide having low loss is obtained without using a conventional photolithography or a etching process.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 17.10.2003

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-43273

(P2003-43273A)

(43) 公開日 平成15年2月13日 (2003.2.13)

(51) IntCl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テーマコード(参考)
G 0 2 B 6/12		G 0 2 B 6/12	Z 2 H 0 4 7
6/13			N
			M

審査請求 未請求 請求項の数19 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2001-227980(P2001-227980)

(22) 出願日 平成13年7月27日(2001.7.27)

(71) 出願人 000005120

日立電線株式会社

東京都千代田区大手町一丁目6番1号

(72) 発明者 井本 克之

茨城県日立市日高町5丁目1番1号 日立

電線株式会社オプトロシステム研究所内

(74) 代理人 100068021

弁理士 網谷 信雄

Fターム(参考) 2H047 KA03 PA02 PA11 PA22 PA28

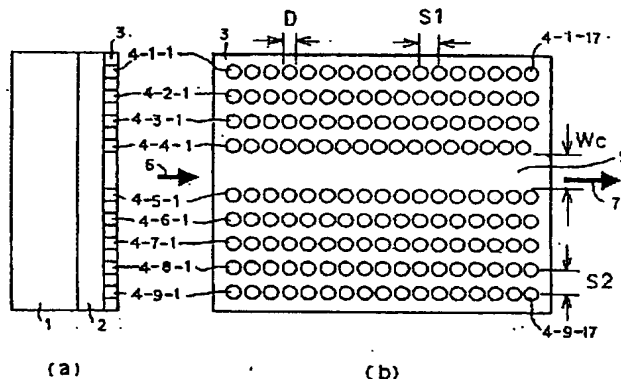
QA05 TA01 TA36

(54) 【発明の名称】 フォトニック結晶導波路及びその製造方法

(57) 【要約】

【課題】 小型で低損失のフォトニック結晶導波路及びその製造方法を提供する。

【解決手段】 フォトブリーチング用ポリマ層の光路としない部分に多数の紫外線レーザービームスポットを所定の間隔S1、S2で直接照射して屈折率低下領域4をマトリクス状に形成することにより、紫外線レーザービームスポットの照射されない領域5の屈折率が相対的に高くなり導波路を形成するので、従来のようなフォトリソグラフィやエッチングプロセスを用いなくて、小型で低損失の導波路が得られる。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 基板上に低屈折率層が設けられ、その低屈折率層の表面若しくは内部に高屈折率のフォトブリーチング用のポリマ層が設けられており、該ポリマ層内に該ポリマ層の吸収波長近傍の波長の紫外線レーザビームが上記ポリマ層の面方向に所定の間隔で照射されて屈折率の低下した屈折率低下領域がマトリックス状に形成されたフォトニック結晶導波路であって、上記屈折率低下領域の中の一部が欠落すると共に、その欠落した領域が形成する欠落パターンが上記ポリマ層の面方向に直線、曲線パターン、あるいはこれらの組み合わせたものからなり、光信号は上記欠落パターンに沿って上記ポリマ層内を伝搬することを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 2】 上記紫外線レーザビームのビームスポット径は  $2\mu\text{m}$  以下である請求項 1 に記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項 3】 上記屈折率低下領域の形状は略円形である請求項 1 又は 2 に記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項 4】 上記屈折率低下領域は直線部が所望間隔で平行に配列されている請求項 1 又は 2 に記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項 5】 上記紫外線レーザの波長は  $250\text{nm}$  から  $445\text{nm}$  の範囲内である請求項 1 から 4 のいずれかに記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項 6】 上記紫外線レーザには連続発振レーザかパルスレーザが用いられている請求項 1 から 5 のいずれかに記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項 7】 上記紫外線レーザビームの照射されていない非照射領域の幅及び屈折率低下領域の幅は  $0.1\mu\text{m}$  以上  $4\mu\text{m}$  以下である請求項 1 から 6 のいずれかに記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項 8】 上記高屈折率のフォトブリーチング用のポリマ層にはポリシラン化合物、ポリシラン化合物にシリコン化合物、シリコン化合物と光酸発生剤を添加したもの、あるいはニトロンを添加したシリコン化合物等が用いられている請求項 1 から 7 のいずれかに記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項 9】 上記屈折率低下領域は上記基板上に少なくとも 2 層積層されたフォトブリーチング用のポリマ層内にそれぞれ形成されており、該ポリマ層内に 3 次元的に光伝搬する光路、あるいは光回路が形成されている請求項 1 から 8 のいずれかに記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項 10】 上記紫外線レーザビームが照射されず光伝搬層となるポリマ層の表面若しくは内部に上記ポリマ層の吸収波長から長波長側にシフトした超短パルスレーザビームが集光、照射されてそのポリマ層の屈折率が高屈折率化している請求項 1 から 9 のいずれかに記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項 11】 上記屈折率低下領域には孔が形成されている請求項 1 から 10 のいずれかに記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項 12】 基板上に低屈折率層を形成する低屈折率層形成工程、該低屈折率層の上に高屈折率のフォトブリーチング用のポリマ層を形成するポリマ層形成工程、該ポリマ層の上から所望幅の光伝搬領域を確保するように該光伝搬領域の両側に紫外線レーザビームを照射して屈折率低下領域を形成する低屈折率領域形成工程、からなることを特徴とするフォトニック結晶導波路の製造方法。

【請求項 13】 基板上に低屈折率層を形成する低屈折率層形成工程、該低屈折率層の上に高屈折率のフォトブリーチング用ポリマ層を形成するポリマ層形成工程、該ポリマ層の上から所望幅の光伝搬領域を確保するように該光伝搬領域の両側に紫外線レーザビームを照射して屈折率低下領域を形成する低屈折率領域形成工程、上記ポリマ層の上に低屈折率の上部クラッド層を形成する上部クラッド層形成工程、からなることを特徴とするフォトニック結晶導波路の製造方法。

【請求項 14】 基板上に低屈折率層を形成する低屈折率層形成工程、該低屈折率層の上に高屈折率のフォトブリーチング用ポリマ層を形成するポリマ層形成工程、上記ポリマ層の上に低屈折率の上部クラッド層を形成する上部クラッド層形成工程、上記ポリマ層の上から所望幅の光伝搬領域を確保するように該光伝搬領域の両側に紫外線レーザビームを照射して屈折率低下領域を形成する低屈折率領域形成工程、からなることを特徴とするフォトニック結晶導波路の製造方法。

【請求項 15】 上記屈折率低下領域を少なくとも 1 回のレーザビーム走査で形成する請求項 12 から 14 のいずれかに記載のフォトニック結晶導波路の製造方法。

【請求項 16】 上記紫外線レーザビームの照射されていない領域からなる直線パターン、曲線パターン、及びこれらの組み合わせパターンを上記基板か上記レーザビームのいずれか一方の相対的移動によって形成する請求項 12 から 14 のいずれかに記載のフォトニック結晶導波路の製造方法。

【請求項 17】 上記高屈折率のフォトブリーチング用ポリマ層にはポリシラン化合物、ポリシラン化合物にシリコン化合物、あるいはシリコン化合物と光酸発生剤を添加したもの、ニトロンを添加したシリコン化合物等を用いる請求項 12 から 16 のいずれかに記載のフォトニック結晶導波路の製造方法。

【請求項 18】 上記レーザ直接描画導波路を基板上に少なくとも 2 層積層する請求項 12 から 17 のいずれかに記載のフォトニック結晶導波路の製造方法。

【請求項 19】 所望径の紫外線レーザビームを照射して屈折率の低下した領域に孔を形成する請求項 12 から 18 のいずれかに記載のフォトニック結晶導波路の製造

方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、フォトニック結晶導波路及びその製造方法に関する。

【0002】

【従来の技術】近年、超小形光回路を実現する技術として、フォトニック結晶を用いた研究が盛んに行なわれるようになってきた。フォトニック結晶とは、ある波長の光を全く通さなかったり、わずかの波長の変化で光の屈折率が大きく変わるといった、ユニークな光学特性を示す人工材料といわれている。

【0003】図13(a)～(f)はフォトニック結晶の外観斜視図である。

【0004】図13(a)はエアギャップ型構造を示し、ウェットエッチングにより形成され、図13(b)は深い回折格子構造を示し、ドライエッチングにより形成される。図13(a)、(b)は共に1次元フォトニック結晶である。図13(c)は垂直孔型構造を示し、ドライエッチング陽極化成により形成され、図13

(d)はピラー型構造を示し、ドライエッチング選択成長により形成される。図13(c)、(d)は共に2次元フォトニック結晶である。図13(e)は斜め孔型構造を示し、ドライエッチングにより形成され、図13

(f)は積み木型構造を示し、張り付けにより形成される。図13(e)、(f)は共に3次元フォトニック結晶である。図中矢印は光の進行方向を示す。

【0005】これらのフォトニック結晶の中で、図13(c)、(d)に示す2次元フォトニック結晶は、基板上に孔や柱を形成したものが典型的な例である。図13(e)、(f)に示す3次元フォトニック結晶は、立体的なモザイク構造からなり、角材状の結晶を積み重ねたものや、小さな球を重ねたものなどがある。すなわち、2種類の媒質の屈折率の差が大きくて、周期構造がある条件を満たすと、特定の波長の光が全く伝達なくなり、外部からの光は結晶に進入できずに反射されてしまう。この波長の範囲がフォトニックバンドギャップと言われている。

【0006】図14はフォトニック結晶の他の従来例を示す外観図である。

【0007】これは、Si基板50上に形成した石英ガラス膜51中に複数の屈折率変化領域52を所定の間隔を隔てて面方向に形成し、その屈折率変化領域の中に屈折率変化領域52の存在しない領域（以下「欠如領域」という。）53を設けることにより、光ファイバ54-1からの光信号55-1を欠如領域53の一方の端面（図では下側）からその欠如領域53内を通して他方の端面（図では上側）から光ファイバ54-2を通して光信号55-2を取り出すようにしたフォトニック結晶導波路である。

【0008】他方、光インターコネクション技術の進展により、装置間をファイバで並列光伝送する方式が実用段階に入ってきた。次世代方式として、ボード内やLSIチップ間を光信号により並列伝送する方式が本格的に検討されるようになってきた。この並列伝送方式を実現するためには、伝送路として、光ファイバの代りに導波路を用いる必要がある。この導波路として、ポリマ材料を用いたポリマ導波路が有力視されている。

【0009】ポリマ材料を用いたポリマ導波路は、低温プロセスで簡単に作製することができるので、ガラス材料を用いた導波路に比して、低コスト化、大型サイズ化の点で優位性が期待できると考えられている。このようなポリマ導波路は、種々の基板の上に、有機溶媒に溶けたポリマ溶液をスピンコーティング法、押し出しコーティング法等で塗布し、その後、低温（ $\leq 300^{\circ}\text{C}$ ）で加熱してポリマ膜とし、フォトリソグラフィやエッチングプロセスを用いて略矩形断面形状の高屈折率のコア用ポリマパターンを得た後に、そのコアパターンを覆うように低屈折率のポリマ膜を形成することで得られる。

【0010】また、フォトレジスト膜のパターニング技術の一案として、フォトマスクを用いずにフォトレジスト膜の上に紫外線レーザビームを直接に照射してフォトレジスト膜を所望パターンに露光する方法が開発されている。

【0011】

【発明が解決しようとする課題】しかし、上述した従来のフォトニック結晶を用いた光回路は、まだ研究段階であり、多くの解決しなければならない課題がある。またポリマ導波路にも実用化に対しては多くの課題が存在している。これらの課題を以下に示す。

【0012】(1) フォトニック結晶を容易に製造することができる構造及びその製造方法はまだ見出されていない。

【0013】(2) また低損失なフォトニック結晶型光回路も見出されていない。

【0014】(3) ポリマ導波路の損失のトップデータとして、今までに0.1 dB/cmが報告されているが、この値はガラス導波路に比してまだ損失が大きく、ガラス導波路の代替候補にはならない。従来のポリマ導波路構造及び製造方法では0.1 dB/cm以下に低損失化することは難しい。

【0015】第1の低損失化が難しい理由として、まず、ポリマ導波路の損失の中で、コア側面の荒れによる散乱損失が極めて大きいことが挙げられる。これの対策として、フォトレジスト膜のパターニングに、フォトマスクを用いずにフォトレジスト膜の上に紫外線レーザビームを直接に照射してフォトレジスト膜を所望パターンに露光する方法を応用することが考えられる。

【0016】しかし、その後に上記パターンをマスクにしてエッチングしなければならないために、エッチング

による側面荒れが必然的に生じてしまい、結果的に低損失化は難しい。

【0017】第2の低損失化が難しい理由として、ポリマ材料固有の吸収基（CH基、OH基）に依存する吸収損失が存在していることが挙げられる。この吸収損失を低減する対策として、ポリマのフッ素化、あるいは重水素化を図る試みが行なわれているが、耐熱性の劣化、成膜の難しさ等の課題が有り、まだ実用的なものは得られていない。

【0018】（4）導波路表面、あるいは裏面、更には内部に電子部品、電子回路、光部品、光回路等をハイブリッド実装する際には半田を用いている。しかし、現状である程度の低損失特性（0.2 dB/cm程度）を期待できるポリマ材料を用いた導波路は耐熱性が悪く、半田リフロー温度（Au/Sn半田のリフロー温度：>280℃）に耐えることが難しく、また280℃以上の温度で実装、処理されると、導波路に用いているポリマの屈折率が変化してしまい、導波路の光学特性が大幅に変わって使用できなくなってしまう。

【0019】これとは逆に耐熱特性を期待できるポリマ材料を用いた導波路では損失が大きかったり、偏波依存性があったりして実用上問題がある。

【0020】そこで、本発明の目的は、上記課題を解決し、小型で低損失のフォトニック結晶導波路及びその製造方法を提供することにある。

【0021】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために本発明のフォトニック結晶導波路は、基板上に低屈折率層が設けられ、その低屈折率層の表面若しくは内部に高屈折率のフォトブリーチング用のポリマ層が設けられており、ポリマ層内にポリマ層の吸収波長近傍の波長の紫外線レーザービームがポリマ層の面方向に所定の間隔で照射されて屈折率の低下した屈折率低下領域がマトリックス状に形成されたフォトニック結晶導波路であって、屈折率低下領域の中の一部が欠落すると共に、その欠落した領域が形成する欠落パターンがポリマ層の面方向に直線、曲線パターン、あるいはこれらの組み合わせたものからなり、光信号は欠落パターンに沿ってポリマ層内を伝搬するものである。

【0022】上記構成に加え本発明のフォトニック結晶導波路に用いられる紫外線レーザービームのビームスポット径は2μm以下であるのが好ましい。

【0023】上記構成に加え本発明のフォトニック結晶導波路の屈折率低下領域の形状は略円形であるのが好ましい。

【0024】上記構成に加え本発明のフォトニック結晶導波路の屈折率低下領域は直線部が所望間隔で平行に配列されているのが好ましい。

【0025】上記構成に加え本発明のフォトニック結晶導波路に用いられる紫外線レーザーの波長は250nmか

ら445nmの範囲内であるのが好ましい。

【0026】上記構成に加え本発明のフォトニック結晶導波路に用いられる紫外線レーザーには連続発振レーザーかパルスレーザーが用いられているのが好ましい。

【0027】上記構成に加え本発明のフォトニック結晶導波路の紫外線レーザービームの照射されていない非照射領域の幅及び屈折率低下領域の幅は0.1μm以上4μm以下であるのが好ましい。

【0028】上記構成に加え本発明のフォトニック結晶導波路の高屈折率のフォトブリーチング用のポリマ層にはポリシラン化合物、ポリシラン化合物にシリコン化合物、シリコン化合物と光酸発生剤を添加したもの、あるいはニトロンを添加したシリコン化合物等が用いられているのが好ましい。

【0029】上記構成に加え本発明のフォトニック結晶導波路の屈折率低下領域は基板上に少なくとも2層積層されたフォトブリーチング用のポリマ層内にそれぞれ形成されており、ポリマ層内に3次的に光伝搬する光路、あるいは光回路が形成されているのが好ましい。

【0030】上記構成に加え本発明のフォトニック結晶導波路は紫外線レーザービームが照射されず光伝搬層となるポリマ層の表面若しくは内部にポリマ層の吸収波長から長波長側にシフトした超短パルスレーザービームが集光、照射されてそのポリマ層の屈折率が高屈折率化しているのが好ましい。

【0031】上記構成に加え本発明のフォトニック結晶導波路の屈折率低下領域には孔が形成されていてもよい。

【0032】本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法は、基板上に低屈折率層を形成する低屈折率層形成工程、低屈折率層の上に高屈折率のフォトブリーチング用のポリマ層を形成するポリマ層形成工程、ポリマ層の上から所望幅の光伝搬領域を確保するように光伝搬領域の両側に紫外線レーザービームを照射して屈折率低下領域を形成する低屈折率領域形成工程、からなるものである。

【0033】本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法は、基板上に低屈折率層を形成する低屈折率層形成工程、低屈折率層の上に高屈折率のフォトブリーチング用ポリマ層を形成するポリマ層形成工程、ポリマ層の上から所望幅の光伝搬領域を確保するように光伝搬領域の両側に紫外線レーザービームを照射して屈折率低下領域を形成する低屈折率領域形成工程、ポリマ層の上に低屈折率の上部クラッド層を形成する上部クラッド層形成工程、からなるものである。

【0034】本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法は、基板上に低屈折率層を形成する低屈折率層形成工程、低屈折率層の上に高屈折率のフォトブリーチング用ポリマ層を形成するポリマ層形成工程、ポリマ層の上に低屈折率の上部クラッド層を形成する上部クラッド層形成工程、ポリマ層の上から所望幅の光伝搬領域を確保す

るように光伝搬領域の両側に紫外線レーザービームを照射して屈折率低下領域を形成する低屈折率領域形成工程、からなるものである。

【0035】上記構成に加え本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法は、屈折率低下領域を少なくとも1回のレーザービーム走査で形成するのが好ましい。

【0036】上記構成に加え本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法は、紫外線レーザービームの照射されていない領域からなる直線パターン、曲線パターン、及びこれらの組み合わせパターンを基板上記レーザービームのいずれか一方の相対的移動によって形成してもよい。

【0037】上記構成に加え本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法は、高屈折率のフォトリソング用ポリマ層にはポリシラン化合物、ポリシラン化合物にシリコン化合物、あるいはシリコン化合物と光酸発生剤を添加したもの、ニトロンを添加したシリコン化合物等を用いるのが好ましい。

【0038】上記構成に加え本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法は、レーザー直接描画導波路を基板上に少なくとも2層積層してもよい。

【0039】上記構成に加え本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法は、所望径の紫外線レーザービームを照射して屈折率の低下した領域に孔を形成してもよい。

【0040】本発明は、フォトリソング用のポリマ層の光路としない部分に、ポリマ層の吸収波長近傍（吸収波長と等しい波長を含む）の多数の紫外線レーザービームスポットを所定の間隔で直接照射して屈折率の低下した領域をマトリクス状に形成することにより、紫外線レーザービームスポットの照射されない領域が相対的に高屈折率となり、導波路を形成するので、従来のようなフォトリソングやエッチングプロセスを用いなくて、小型で低損失の導波路を形成することができる。

【0041】フォトリソング用ポリマ層として、例えばポリシラン化合物を用いれば、そのポリマ層に波長266nmのDeep UVの紫外線レーザービームを照射することにより、照射前の屈折率に対して照射後の屈折率を比屈折率差で最大8%程度低くすることができる。また紫外線レーザーとして、波長800nmで発振する超短パルスレーザーの第3高調波（波長266nm）を用い、パルス幅を1000fs以下にすることにより、そのパルス幅内で極めて大きなエネルギーを得ることができるので、所定の間隔で面方向にマトリクス状に構成した屈折率低下領域に孔を開けることができ、より一層の大きな屈折率変化構造を実現することができ、更なる小型のフォトニック結晶導波路を実現することが可能となる。なお、孔開けの制御はレーザービームの平均出力値、パルス幅、くり返し周波数、基板の移動速度等によって行なうことができる。

【0042】なお、紫外線レーザービームは2μm以下に絞ることができるので、紫外線レーザービーム照射による

低屈折率の微小領域を所定の間隔でマトリクス状に構成してフォトニックバンドギャップ構造を形成し、マトリクス状のバンドギャップ構造の中に微小領域の欠落したパターンを設け、パターン内に光信号を伝搬させるようにしたフォトニック結晶導波路を実現することが可能となる。しかもポリシラン化合物の膜は波長1.3μm、1.55μmにおいて、伝搬損失が0.1dB/cm以下の低損失であるので、低損失なフォトニック結晶導波路を実現することが可能となる。

【0043】また前述したように、フォトリソング用ポリマ層に紫外線レーザービームを直接照射により所望パターンを描画してフォトニック結晶導波路を構成するようにして作製するので、構造不均一に依存する散乱損失の極めて少ないフォトニック結晶導波路を製造することができる。

【0044】さらに3次元CAD（Computer Aided Design）を用いることにより、積層したポリシラン化合物からなるポリマ層内に3次元光回路を形成することもできる。

【0045】さらに製造方法の面からは、ポリマ溶液をスピンコーティング法で塗布し、加熱によりポリマ層を形成するという非常に簡易な製造方法であり、低コスト化を期待することができる。

【0046】フォトリソング用ポリマ層には、ポリシラン化合物、ポリシラン化合物にシリコン化合物、あるいはシリコン化合物と光酸発生剤を添加したものをを用いることができる。なお、孔を開けた構造のフォトニック結晶導波路において、導波路を300℃よりも高い温度で熱処理を行なって無機化を促進させることにより、ポリマ材料固有の吸収基（CH基、OH基）に依存する吸収損失を低減することができる。またAu/Sn半田リフロー温度（Au/Sn半田のリフロー温度：>280℃）に耐えることができるので、導波路表面、あるいは裏面、更には内部に電子部品、電子回路、光部品、光回路等をハイブリッド実装することが可能となる。

【0047】さらに紫外線レーザービームとして、上述したようにパルスレーザービームを用いれば照射されたポリマ層の熱的なダメージを受けることなく、低い平均出力レーザービームパワーでポリマ層の屈折率を低下させることができる。また紫外線レーザービームは、連続波に比してパルスにすることにより、瞬間的に高い光強度を持ちながら平均強度が低いので、短時間で厚いポリマ層に対してもその深さ方向に屈折率変化を一様に生じさせることができる。すなわち、短時間で導波路化を実現させることが可能となる。なお、深さ方向の屈折率変化を起こさせる度合いはレーザービームのパワー、被加工物（あるいはレーザービームのどちらか）の移動速度を調節することにより制御することができる。また同じ領域にレーザ

ビームを複数回照射するようにしてもよい。

【0048】さらにレーザビームのビームスポット径を調節することにより、屈折率の低下した領域の幅や光伝搬領域の幅を制御することができる。

【0049】さらに紫外線レーザの波長はポリマ層に吸収されてその屈折率変化を起こす波長帯から選ばれるが、最大吸収波長に選ぶのが好ましい。最大吸収波長からずれた波長のレーザを用いる場合には、そのずれ分を補うために過剰のパワーを必要とする。

【0050】本発明の別の特長はフォトマスクを使用しないので、導波路製造コストを大幅に安くすることができる点にある。特に、光回路パターンの異なった種々の光回路を作製する際のコストを大幅に安く、かつ、短時間に作製できるので、トータルコストパフォーマンスを抜本的に改善することができる。

【0051】さらに本発明は光回路の特性の変更がインラインでモニタしながらレーザビーム照射により実現でき、トリミングによる光学特性の改善もできる。

【0052】さらにレーザビーム照射により屈折率変化を持たせたポリマ層はほぼ平坦な面を保持しているの  
で、その上に上部クラッド層を形成してもその面も平坦な面を保持できる。その結果、その上面に電子部品、電子回路、光部品、光回路等を高寸法精度で実装することができる。

【0053】紫外線レーザビームの照射されていない欠落パターン領域の表面、あるいは内部に波長がポリマの吸収波長からはずれた長波長側の超短パルスレーザビームを集光、照射してその領域の屈折率を高屈折率化するようにしても良い。超短パルスレーザビームとして、波長は600nmから1600nmの範囲から選び、パルス幅として、数千fsから数十fsの範囲を選び、パルスの繰り返し周波数を10Hzから200kHzの範囲から選ぶ。平均出力は数十mwから数百mwの範囲から選ぶのが好ましい。このように欠落パターン領域の屈折率を高くすることはその領域、すなわち、光伝搬層内への光の閉じ込めを一層良くし、かつ、超短パルスレーザビーム照射で光伝搬層内の有機物が一層取り除かれて無機化され、かつ高密度で光散乱中心の少ない光伝搬層へ改質することができる。

【0054】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態を添付図面に基づいて詳述する。

【0055】図1(a)は本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の一実施の形態を示す側面図であり、図1(b)は上面図である。

【0056】この導波路は、基板1の上に低屈折率層2を形成し、その低屈折率層2の上にフォトリソ用ポリマ層3を形成した構造を有している。ポリマ層3内には所望径Dの紫外線レーザビームが照射されて屈折率低下領域4を面方向(図1(b)では縦、横)に所定

の間隔S1、S2でマトリックス状に4-1-1から4-9-17のように形成し構造を有し、マトリックス構造の中に屈折率低下領域4が欠落し、欠落パターンが導波路の一方(図1(b)では左側)の端面から他方(図1(b)では右側)の端面に向かって直線パターン5が形成されたものである。光信号は欠落パターン5に沿ってポリマ層3内を矢印6から矢印7のように伝搬するようになっている。

【0057】この導波路は、紫外線レーザビームのスポットサイズDを2μm以下にすることができるので、紫外線レーザビームが照射されて屈折率低下領域4の直径も2μm以下にすることが好ましい。また屈折率低下領域4の周期的な間隔も2μm以下にすることが好ましい。屈折率低下領域4の欠落した直線パターンの幅は4μm以下にすることが好ましい。なお、これらの構造パラメータはシングルモード伝搬条件、ポリマ層3と屈折率低下領域4の比屈折率差、フォトリソバンドギャップ条件を考慮に入れて決めることができる。屈折率低下領域4は前述したように、フォトリソ用ポリマ層として、例えばポリシラン化合物を用いれば、そのポリマ層に波長266nmのDeep UVの紫外線レーザビームを照射することにより、照射前の屈折率に対して照射後の屈折率を比屈折率差で最大8%程度を実現することができる。またマトリックス状に構成した屈折率低下領域4の形成用紫外線レーザとして、波長800nmで発振する超短パルスレーザの第3高調波(波長266nm)を用い、パルス幅を1000fs以下にすることにより、そのパルス幅内で極めて大きなエネルギーを得ることができるので、マトリックス状に構成した屈折率低下領域4に孔を開けることができる。この場合にはより一層の大きな屈折率変化構造を実現することができ、更なる小型のフォトニック結晶導波路を実現することができる。孔開けの制御は超短パルスレーザビームの平均出力値、パルス幅、くり返し周波数、基板の移動速度等によって行なうことができる。ポリマ層3の厚みはシングルモード伝搬条件を考慮に入れて6μm以下にすることが好ましい。

【0058】基板1には、ガラス、セラミックス、プラスチック、半導体、強誘電体、ガラスとプラスチックの複合材、さらには上記材料の組み合わせ材料等を用いることができる。

【0059】低屈折率層2には、SiO<sub>2</sub>、SiO<sub>2</sub>にGe、P、Ti、B、Zn、Sn、Ta、F等の屈折率制御用ドーパントを少なくとも一種添加したもの、ポリマ層、有機と無機の複合層等を用いることができる。

【0060】フォトリソ用ポリマ層3については、ポリシラン化合物、ポリシラン化合物にシリコン化合物、あるいはシリコン化合物と光酸発生剤を添加したもの、ニトロンを添加したシリコン化合物等を用いる。

【0061】ここで、まず本発明に適用できるポリシラン化合物について述べる。

【0062】本発明に用いるポリシラン化合物としては、直鎖型及び分岐型を用いることができる。分岐型と直鎖型とは、ポリシラン中に含まれるSi原子の結合状態によって区別される。すなわち、分岐型ポリシランとは、隣接するSi原子と結合している数（結合数）が、3または4であるSi原子を含むポリシランである。

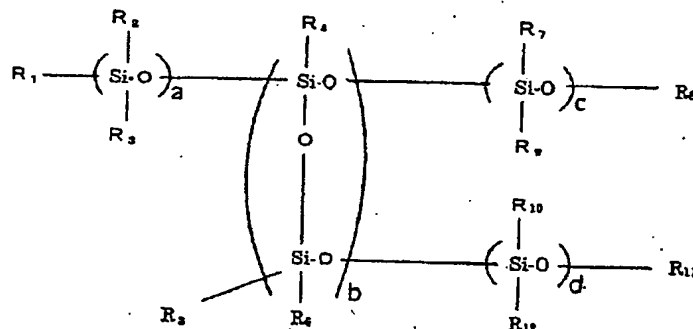
【0063】これに対して、直鎖型のポリシランは、Si原子の、隣接するSi原子との結合数は2である。通常、Si原子以外に、炭化水素基、アルコキシ基または水素原子と結合している。

【0064】このような炭化水素基としては、炭素数1～10のハロゲンで置換されていてもよい脂肪族炭化水素基、炭素数6～14の芳香族炭化水素基が好ましい。脂肪族炭化水素基の具体例として、メチル基、プロピル基、ブチル基、ヘキシル基、オクチル基、デシル基、トリフルオロプロピル基及びノナフルオロヘキシル基等の鎖状のもの、及びシクロヘキシル基、メチルシクロヘキシル基のような脂環式のもの等が挙げられる。

【0065】また芳香族炭化水素基の具体例としては、フェニル基、p-トリル基、ビフェニル基及びアントラシル基等が挙げられる。アルコキシ基としては、炭素数1～8のものが挙げられる。具体例としては、メトキシ基、エトキシ基、フェノキシ基、オクチルオキシ基等が挙げられる。合成の容易さを考慮すると、これらの中でメチル基及びフェニル基が特に好ましい。

【0066】分岐型ポリシランの場合には、隣接するSi原子との結合数が3または4であるSi原子は、分岐型ポリシラン中の全体のSi原子数の2%以上であることがより好ましい。2%未満のものや直鎖型のポリシランは結晶性が高く、膜中で微結晶が生成し易いことにより光散乱の原因となり、光透明性が低下し易い。

\*



【0073】ただし、化1式中、R1からR12は、炭素数1～10のハロゲンまたはグリシジルオキシ基で置換されていてもよい脂肪族炭化水素基、炭素数6～12の芳香族炭化水素基、炭素数1～8のアルコキシ基からなる群から選択される基であり、同一でも異なっている。a、b、c及びdは0を含む整数であり、a +

50

\* 【0067】本発明に用いるポリシランはハロゲン化シラン化合物をナトリウムのようなアルカリ金属の存在下、n-デカンやトルエンのような有機溶媒中において80℃以上に加熱することによる重縮合反応によって製造することができる。また電解重合法や、金属マグネシウムと金属塩化物を用いた方法でも合成可能である。

【0068】分岐型ポリシランの場合には、オルガノトリハロシラン化合物、テトラハロシラン化合物、及びジオルガノジハロシラン化合物からなり、オルガノトリハロシラン化合物及びテトラハロシラン化合物が全量の2モル%以上であるハロシラン混合物を加熱して重縮合することにより、目的とする分岐型ポリシランが得られる。

【0069】ここで、オルガノトリハロシラン化合物は、隣接するSi原子との結合数が3であるSi原子源となり、一方のテトラハロシラン化合物は、隣接するSi原子との結合数が4であるSi原子源となる。なお、ネットワーク構造の確認は、紫外線吸収スペクトルや珪素の核磁気共鳴スペクトルの測定により確認することができる。

【0070】ポリシランの原料として用いられるオルガノトリハロシラン化合物、テトラハロシラン化合物、及びジオルガノジハロシラン化合物がそれぞれ有するハロゲン原子は、塩素原子であることが好ましい。オルガノトリハロシラン化合物及びジオルガノハロシラン化合物が有するハロゲン原子以外の置換基としては、炭化水素基、アルコキシ基または水素原子が挙げられる。

【0071】次に本発明のポリシラン化合物に添加するシリコン化合物としては、化1式で示されるものを用いる。

【0072】

【化1】

b + c + d ≥ 1を満たすものである。このシリコン化合物が有する、脂肪族炭化水素基の具体例として、メチル基、プロピル基、ブチル基、ヘキシル基、オクチル基、デシル基、トリフルオロプロピル基、グリシジルオキシプロピル基等のような脂環式のものが挙げられる。またアルコキシ基の具体例としては、メトキシ基、エト



キシ基、フェノキシ基、オクチルオキシ基、*tert*-ブトキシ基等が挙げられる。R1からR12の種類及びa、b、c、dの値は特に重要ではなく、ポリシラン及び有機溶媒と相溶し、膜が透明なものであれば特に限定されない。相溶性を考慮した場合には、使用するポリシランが有する炭化水素基と同じ基を有していることが好ましい。例えば、ポリシランとして、フェニルメチル系のものを使用する場合には、同じフェニルメチル系またはジフェニル系のシリコン化合物を使用することが好ましい。

【0074】またR1からR12のうち、少なくとも2つが炭素数1～8のアルコキシ系であるような、1分子中にアルコキシ基を2つ以上有するシリコン化合物は、架橋材として利用可能である。そのようなものとしては、アルコキシ基を15から35重量%含んだメチルフェニルメトキシシリコンやフェニルメトキシシリコン等を挙げることができる。分子量としては、1000以下、好ましくは3000以下のものが好適である。

【0075】なお、膜中のCH基やOH基による光吸収を低減するために、ポリシラン化合物やシリコン化合物に重水素化、あるいは少なくとも一部がハロゲン化、特にフッ素化したものを用いれば、吸収基による光損失を大幅に低減することができる。これにより、波長依存性の少ない低光損失のポリマ膜を実現可能となり、高性能導波路型光部品及び光デバイス用として幅広い範囲に用途を拡大することが可能となる。

【0076】またシリコン化合物に架橋性、あるいはアルコキシ基からなるものを用いることによって分岐型ポリシラン化合物の中に均一に添加することができ、しかもトルエンのような有機溶媒中に容易に可溶してナノメートルレベルの超微粒子状溶液となり、ポリマ溶液を用いることによって光散乱中心のない均一な構造体や膜を形成することができる。

【0077】次に低屈折率素2上へのポリマ層の成膜方法について説明する。

【0078】ポリマ化合物を有機溶媒に溶かしてポリマ溶液とし、そのポリマ溶液を低屈折率層2上へスピンコーティング法や押し出しコーティング法などで塗布する。ついで80℃から150℃の温度範囲で20分から40分程度プリベークする。その後200℃から300℃の温度範囲で20分から60分程度のポストベークを行ない、ポリマ層とする。なお、プリベーク及びポストベークはプログラム式温度制御型電気炉内で昇温、定温保持、昇温、定温保持、降温工程を連続的に行なうようにしても良い。

【0079】ここで、本実施の形態に用いる有機溶媒には、炭素数5～12の炭化水素系、ハロゲン化炭化水素系及びエーテル系等である。炭化水素の例としては、ペンタン、ヘキサン、ヘプタン、シクロヘキサン、*n*-デ

カン、*n*-ドデカン、ベンゼン、トルエン、キシレン、メトキシベンゼン等を用いることができる。ハロゲン化炭化水素系の例としては、四塩化炭素、クロロホルム、1,2-ジクロロエタン、ジクロロメタン、クロロベンゼン等を用いることができる。エーテル系の例としては、ジエチルエーテル、ジブチルエーテル、テトラヒドロフラン等を用いることができる。またフォトリソ用ポリマ材料として、ニトロン化合物を含んだシリコン化合物用の有機溶媒として、前述したように、PEGMAを用いても良い。フォトリソ用ポリマ材料には、有機溶媒に溶ける材料でなければならない。

【0080】次に上述した方法によって作製したポリマ層に紫外線レーザービームを照射して低屈折率に変化した領域4を形成する方法について説明する。

【0081】紫外線レーザーとしては、発振波長が266nmのレーザー（波長800nmのチタニウムドープのサファイア結晶を用いたモードロックのフェムト秒レーザーの第3高調波レーザー）、発振波長が266nmのDeep UVの紫外線レーザー、発振波長が325nmのHe-Cdレーザー、発振波長が355nmのYAGレーザーの第3高調波レーザー、発振波長が400nmの半導体レーザー、発振波長が442nmのHe-Cdレーザーなどを用いることができる。発振出力は連続波、またはパルス発振のものを用いることができる。

【0082】ポリマ層の一例として、分岐度が20%の分岐状ポリメチルフェニルシラン化合物にシリコン化合物を50wt%添加したポリマを有機溶媒トルエンに溶かしてフォトリソ用ポリマ溶液が挙げられる。このポリマ溶液を基板1（石英ガラス基板）上の低屈折率層2（SiO<sub>2</sub>層、膜厚約10μm）上に塗布し、150℃、20分のプリベークの後に、200℃、30分のポストベークを行なって厚さ約5μmのポリマ層を得た。このポリマ層上に発振波長が442nmのHe-Cdレーザー（ポリマ層表面での連続波パワー値：約5mw）をレーザービームスポット径約1.6μmに保持して、基板1を100μm/sの速度で移動させながらレーザーを周期的にON、OFFを繰り返しながら50mm×50mmの低屈折率層2の形成された基板1上のポリマ層3に低屈折率に変化した領域4-1-1から4-9-17を形成した。その結果、ポリマ層3と低屈折率に変化した領域4との比屈折率差Δを約5%とすることができた。なお、上記領域4の直径、間隔はいずれも約1.5μmであった。また欠落した直線パターンの幅は約3μmであった。

【0083】次に変形例として、上記条件の内、基板1の移動速度だけを50μm/sで低屈折率化を行なった結果、比屈折率差Δを6.5%とすることができた。

【0084】これらの結果から、レーザービーム照射部でのエネルギーを高くすることによって、低屈折率化を促進させることができることが分かった。またポリシラン

化合物の紫外線での最大吸収波長域に近い325nmか、もう一つの吸収波長266nmの発振波長を有するレーザを用いばさらに一層の低屈折率化を促進させることができる。

【0085】図2(a)は本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す側面図であり、図2(b)は上面図である。

【0086】この導波路は、屈折率変化をもたらしたポリマ層3の上に低屈折率層2と同じ層、すなわち、上部クラッド層8を形成して埋め込み導波路としたものである。

【0087】また低屈折率層2及び上部クラッド層8については以下のような材料を用いて作製しても良い。すなわち、分岐度が20%の分岐状ポリメチルフェニルシラン化合物にシリコン化合物を50wt%添加したポリマを有機溶媒トルエンに溶かしてフォトブリーチング用ポリマ溶液を作製し、この溶液に予め紫外線(150w水銀キセノンランプからの光を直径20mmのイメージファイババンドル内を伝搬させて出力させた光を約10cm離して照射、その出力は約1200mw/cm<sup>2</sup>)を135分照射することによって屈折率を低下

(波長632.8nmにおける屈折率を紫外線照射前には1.645から1.62に低下)させ、この溶液を基板1上に塗布し、150℃、20分のプリベークの後、200℃、20分のポストベークを行なって低屈折率層2用のポリマ層とすることにより得られる。上部クラッド層8も同様の方法で形成する。なお、紫外線レーザビーム照射は、上部クラッド層8を形成した後でポリマ層3にレーザビームを集光、照射してもよい。この導波路も図1(a)、(b)に示した導波路と同様の効果が得られる。

【0088】図3(a)は本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す側面図であり、図3(b)は上面図である。

【0089】この導波路は、フォトブリーチング用ポリマ層3内に紫外線レーザビームを集光、照射して略球形状の低屈折率領域(屈折率の低下したポリマ領域か、孔を開けられた領域)を形成したものである。この低屈折率領域は、パルス幅が1000fs以下の紫外線超短パルスレーザビームを集光、照射して形成したものである。この導波路も図1(a)、(b)に示した導波路と同様の効果が得られる。

【0090】図4(a)は本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す側面図であり、図4(b)は上面図である。

【0091】この導波路も、フォトブリーチング用ポリマ層3内の表面近傍に紫外線レーザビームを集光、照射して略球形状の低屈折率領域(屈折率の低下したポリマ領域か、孔が開けられた領域)を形成したものである。

【0092】この導波路も図1(a)、(b)に示した

導波路と同様の効果が得られる。

【0093】図5(a)は本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す側面図であり、図5(b)は上面図である。

【0094】この導波路は、図3(a)、(b)に示した導波路の上面に上部クラッド層8を形成したものである。

【0095】この導波路も図1(a)、(b)に示した導波路と同様の効果が得られる。

【0096】図6(a)は本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す側面図であり、図6(b)は上面図である。

【0097】この導波路は欠落部を5-1、5-2のように直角に曲げた光路として光信号6を直角に曲げて矢印7方向に伝搬させるようにしたフォトニック結晶導波路である。この導波路も図1(a)、(b)に示した導波路と同様の効果が得られる。

【0098】図7は本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す上面図である。

【0099】この導波路は、欠落部をY字状に5-1、5-2、5-3、5-4、5-5のように設けることにより、光信号6を二つの方向6-1、6-2に分岐させて伝搬させ、矢印7-1、7-2方向に出射させるようにした分岐導波路構造を示したものである。

【0100】この導波路も図1(a)、(b)に示した導波路と同様の効果が得られる。

【0101】図8(a)は本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す側面図であり、図8(b)は図8(a)の8b-8b線断面図であり、図8(c)は図8(a)の8c-8c線断面図である。

【0102】この導波路は、2層のフォトブリーチング用ポリマ層3-1、3-2を積層したものであり、上部のフォトブリーチング用ポリマ層3-2内の欠落部5-1内に入射光を入射させて伝搬させ、途中から下部のフォトブリーチング用ポリマ層3-1内の欠落部5-2内に直角に曲げて伝搬させ、矢印7のごとく出射させるようにしたものである。すなわち、本導波路は3次元光導波路である。尚、4a-1-1~4a-13-21、4b-1-1~4b-12-21は屈折率低下領域をそれぞれ示す。

【0103】上記2層以外に、多層状にフォトブリーチング用ポリマ層を積層させ、それぞれのポリマ層内に欠落部領域を設けるようにすれば、3次元光回路を実現することができる。すなわち、光信号を積層ポリマ層の深さ方向に直角、斜め方向などに曲げて伝搬させたり、それぞれのポリマ層間で光結合させて伝搬させたりすることができる。

【0104】図9は本発明のフォトニック結晶導波路の

製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す上面図である。

【0105】この導波路に光信号6を矢印6-1、6-2、6-3、6-4、6-5、6-6、6-7、7のように伝搬させるようにフォトリソング用ポリマ層3内に欠落部をジグザグ状に形成したものである。

【0106】この導波路も図1(a)、(b)に示した導波路と同様の効果が得られる。

【0107】図10(a)は本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す側面図であり、図10(b)は上面図である。

【0108】この導波路は、基板1上に複数(図では9層であるが限定されない。)のフォトリソング用ポリマ層3-1~3-9を積層させ、それぞれの層内に低屈折率領域4を面方向に所定の間隔でフォトニックバンドギャップ構造を形成するように設け、フォトリソング用ポリマ層3-5内に直線的パターン5の欠落部5を設けたものである。

【0109】そして、直線的パターン5内を矢印6方向に光信号を入射させ、矢印7方向に出力させるように構成したものである。この導波路も図1(a)、(b)に示した導波路と同様の効果が得られる。

【0110】尚、本実施の形態では、フォトリソング用ポリマ層3-5内のみに欠落部を設けたが、それぞれのポリマ層内に欠落部を設けて、これらの層全体で3次元光伝搬や3次元光回路を形成してもよい。

【0111】図11(a)は本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す側面図であり、図11(b)は図11(a)の11b-11b線断面図である。

【0112】図1(a)、(b)~図10(a)、(b)に示した実施の形態は、低屈折率領域4が直径Dの略円形状構造のものであったが、本実施の形態は幅Waを有する線状構造とし、この幅Waを2μm以下とし、各線状部4Lの間隔S3も2μm以下にすることにより、フォトニックバンドギャップ構造を構成したものである。なお、低屈折率の線状部4Lは孔であってもよく、中実であってもよい。この導波路も図1(a)、(b)に示した導波路と同様の効果が得られる。

【0113】図12は本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す上面図である。

【0114】この導波路は、光信号を矢印6方向から矢印7方向に直角に曲げて伝搬させるように欠落部を構成したものである。すなわちL字形状の複数の低屈折率の線状部4Laを平行に配置すると共に光信号を伝搬させる部分5が形成されるように離したものである。この導波路も図1(a)、(b)に示した導波路と同様の効果が得られる。

【0115】本発明は上記実施の形態に限定されない。

【0116】たとえば、シリコン化合物を添加したポリシラン化合物に光酸発生剤(融点192℃、最大吸収波長77nmのパラメトキシシルトリアジン)を2%から5%添加したポリマ層を用いてもよい。この場合には導波路損失は多少増加傾向にあったが、紫外線レーザービーム照射による低屈折率変化領域のパターンの深さ方向の均一性が一層向上し、より寸法精度の高い矩形コア層を実現することができた。光酸発生剤としては、トリアジン系のものが良いことが分かった。

【0117】上部クラッド層6の上には紫外線カット層を設けて長期的にコア層5の屈折率が変化しないようにしてもよい。

【0118】ポリシラン化合物、シリコン化合物、トリアジン系化合物、光酸発生剤等は種々のものを適用することができる。例えば、ポリシラン化合物には分岐度が2%以上の分岐状ポリシラン化合物が光透明度の点から好ましい。光酸発生剤にはトリアジン系が好ましく、その中でも長波長での光透明度の高いもの、融点の高いものが好ましい。シリコン化合物も光透明度の高いもの、融点の高いものなどが好ましい。

【0119】また紫外線レーザービームの照射されていない光伝搬層となる欠落部の表面、あるいは内部に波長が上記ポリマの吸収波長からはずれた波長の超短パルスレーザービームを集光、照射してそのコア層の屈折率を高屈折率化するようにしても良い。

【0120】超短パルスレーザービームとして、波長は600nmから1600nmの範囲(好ましくは800nmの波長)から選び、パルス幅として、数千fsから数十fsの範囲から選び、パルスの繰り返しを10Hzから200kHzの範囲から選ぶ。平均出力は数十mwから数百mwの範囲から選ぶのが好ましい。このようにコア層の屈折率を1.6のごとく高くすることはコア層内への光の閉じ込めを一層強くし、かつ、超短パルスレーザービーム照射でコア層内の有機物が一層取り除かれて無機化され、かつ高密度で光散乱中心の少ない高均質なコア層へ改質することができる。なお、レーザービームのパルス幅を狭くすればするほどそのパルス幅内のエネルギーは非常に高くなり、熱的なダメージを全く受けないで高屈折率化を実現することができる。

【0121】以上のように、本発明は下記に示すような効果を有している。

【0122】(1)本発明は、従来のようなフォトリソグラフィ、エッチングプロセスを用いなくて、フォトリソング用ポリマ層に紫外線レーザービームを直接照射により所望パターンを描画してフォトニック結晶導波路を構成するようにしたものである。フォトリソング用ポリマ層として、例えばポリシラン化合物を用いれば、その層に波長266nmのDeep UVの紫外線レーザービームを照射することにより、照射前の屈折率に対して照射後の屈折率を比屈折率差で最大8%程度低く

することができる。また紫外線レーザとして、波長 800 nm で発振する超短パルスレーザの第 3 高調波 (波長 266 nm) を用い、パルス幅を 1000 fs 以下にすることにより、そのパルス幅内で極めて大きなエネルギーを得ることができるので、マトリックス状に構成した屈折率低下領域に孔を開けることができ、より一層の大きな屈折率変化構造を実現することができ、更なる小型のフォトニック結晶導波路を実現することができる。なお、孔開けの制御はレーザビームの平均出力値、パルス幅、くり返し周波数、基板の移動速度等によって行なうことができる。

【0123】(2) 紫外線レーザビームは 2  $\mu$ m 以下に絞ることができるので、紫外線レーザビーム照射による低屈折率の微小領域を周期的にマトリックス状に構成してフォトニックバンドギャップ構造を形成し、マトリックス状のバンドギャップ構造の中に微小領域の欠落したパターンを設け、パターン内に光信号を伝搬させるようにしたフォトニック結晶導波路を実現することができる。しかもポリシラン化合物の膜は波長 1.3  $\mu$ m、1.55  $\mu$ m において、伝搬損失が 0.1 dB/cm 以下の低損失であるので、低損失なフォトニック結晶導波路を実現することができる。

【0124】(3) フォトリソグラフィ、エッチングプロセスを用いなく、フォトリソ用ポリマ層に紫外線レーザビームを直接照射により所望パターンを描画してフォトニック結晶導波路を構成するようにして作製するので、構造不均一に依存する散乱損失の極めて少ないフォトニック結晶導波路を製造することができる。

【0125】(4) 3次元CAD (Computer Aided Design) を用いることにより、積層したポリシラン化合物からなるポリマ層内に3次元光回路を形成することもできる。

【0126】(5) 製造方法の面からは、ポリマ溶液をスピンコーティング法で塗布、加熱によりポリマ層を形成することができるので、非常に簡易な製造方法であり、低コスト化を期待することができる。

【0127】(6) フォトリソ用ポリマ層には、ポリシラン化合物、ポリシラン化合物にシリコン化合物、あるいはシリコン化合物と光酸発生剤を添加したものをを用いることができる。なお、孔を開けた構造のフォトニック結晶導波路において、導波路を 300℃ よりも高い温度で熱処理を行なって無機化を促進させることにより、ポリマ材料固有の吸収基 (CH基、OH基) に依存する吸収損失を低減することができる。また Au/Sn 半田リフロー温度 (Au/Sn 半田のリフロー温度: >280℃) に耐えることができるので、導波路表面、あるいは裏面、更には内部に電子部品、電子回路、光部品、光回路等をハイブリッド実装することが可能となる。

【0128】(7) 紫外線レーザビームとして、上述し

たようにパルスレーザビームを用いれば照射されたポリマ層の熱的なダメージを受けることなく、低い平均出力レーザビームパワーでポリマ層の屈折率を低下させることができる。また連続波に比してパルスにすることにより、瞬間的に高い光強度を持ちながら平均強度が低いので、短時間で厚いポリマ層に対してもその深さ方向に屈折率変化を一樣に生じさせることができる。すなわち、短時間で導波路化を実現させることが可能となる。なお、深さ方向の屈折率変化を起こさせる度合いはレーザビームのパワー、被加工物 (あるいはレーザビームのいずれか一方) の移動速度を調節することにより制御することができる。また同じ領域にレーザビームを複数回照射するようにしてもよい。

【0129】(8) レーザビームのビームスポット径を調節することにより、屈折率低下領域の幅 Wc を制御することができる。

【0130】(9) 紫外線レーザの波長はポリマ層に吸収されてその屈折率変化を起こす波長帯から選ばれるが、最大吸収波長に選ぶのが好ましい。最大吸収波長からずれた波長のレーザを用いる場合には、そのずれ分を補うために過剰のパワーを必要とする。

【0131】本発明の別の特長はフォトマスクを使用しないので、導波路製造コストを大幅に安くすることができる点にある。特に、光回路パターンの異なった種々の光回路を作製する際のコストを大幅に安く、かつ、短時間に作製できるので、トータルコストパフォーマンスを抜本的に改善することができる。

【0132】(10) 光回路の特性の変更がインラインでモニタしながらレーザビーム照射ででき、またトリミングによる光学特性の改善もできる特長がある。

【0133】(11) レーザビーム照射により屈折率変化を持たせたポリマ層はほぼ平坦な面を保持しているので、その上に上部クラッド層を形成してもその面も平坦な面を保持できる。その結果、その上面に電子部品、電子回路、光部品、光回路等を高寸法精度で実装することができる。

【0134】(12) 紫外線レーザビームの照射されていない欠落パターン領域の表面、あるいは内部に波長がポリマの吸収波長からはずれた波長の超短パルスレーザビームを集光、照射してその領域の屈折率を高屈折率化するようにしても良い。超短パルスレーザビームとして、波長は 600 nm から 1600 nm の範囲から選び、パルス幅として、数千 fs から数十 fs の範囲を選び、パルスの繰返し周波数を 10 Hz から 200 kHz の範囲から選ぶ。平均出力は数十 mW から数百 mW の範囲から選ぶのが好ましい。このように欠落パターン領域の屈折率を高くすることはその領域、すなわち、光伝搬層内への光の閉じ込めを一層良くし、かつ、超短パルスレーザビーム照射で光伝搬層内の有機物が一層取り除かれて無機化され、かつ高密度で光散乱中心の少ない光

伝搬層層へ改質することができる。

【0135】

【発明の効果】以上要するに本発明によれば、次のような優れた効果を発揮する。

【0136】小型で低損失のフォトニック結晶導波路及びその製造方法の提供を実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】(a)は本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の一実施の形態を示す側面図であり、(b)は上面図である。

【図2】(a)は本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す側面図であり、(b)は上面図である。

【図3】(a)は本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す側面図であり、(b)は上面図である。

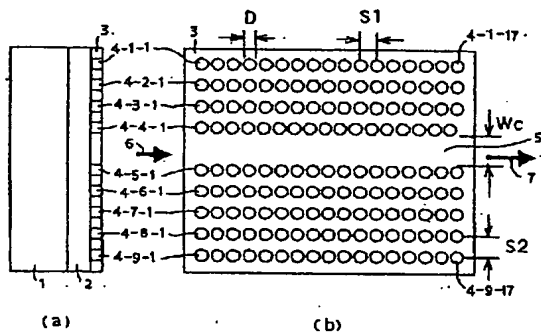
【図4】(a)は本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す側面図であり、(b)は上面図である。

【図5】(a)は本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す側面図であり、(b)は上面図である。

【図6】(a)は本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す側面図であり、(b)は上面図である。

【図7】本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す上面図である。\*

【図1】



\*【図8】(a)は本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す側面図であり、(b)は(a)の8b-8b線断面図であり、(c)は(a)の8c-8c線断面図である。

【図9】本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す上面図である。

【図10】(a)は本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す側面図であり、(b)は上面図である。

10 【図11】(a)は本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す側面図であり、(b)は(a)の11b-11b線断面図である。

【図12】本発明のフォトニック結晶導波路の製造方法を適用した導波路の他の実施の形態を示す上面図である。

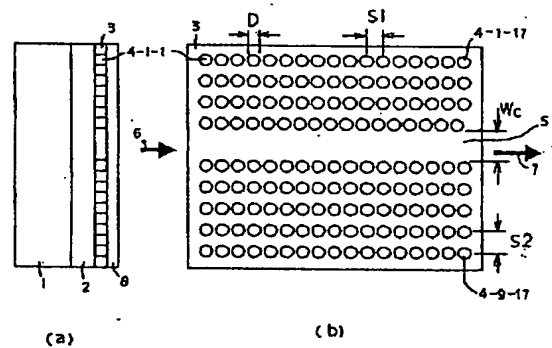
【図13】(a)～(f)はフォトニック結晶の外観斜視図である。

20 【図14】フォトニック結晶の他の従来例を示す外観図である。

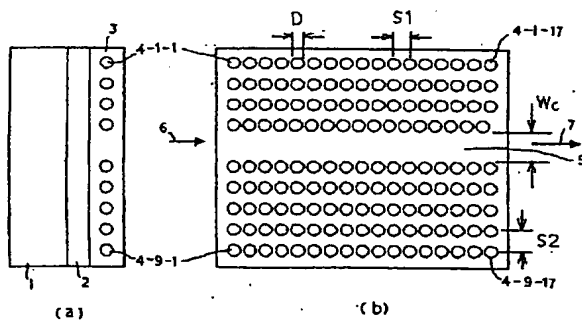
【符号の説明】

- 1 基板
- 2 低屈折率層
- 3 フォトブリーチング用ポリマ層
- 4-1-1～4-9-1 屈折率低下領域
- 5 直線パターン
- 8 上部クラッド層

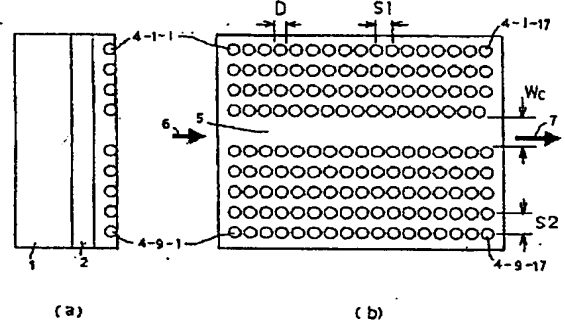
【図2】



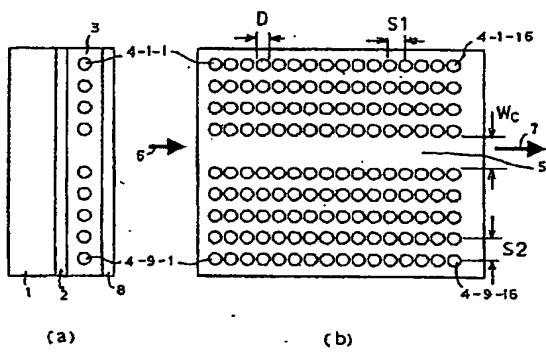
【図 3】



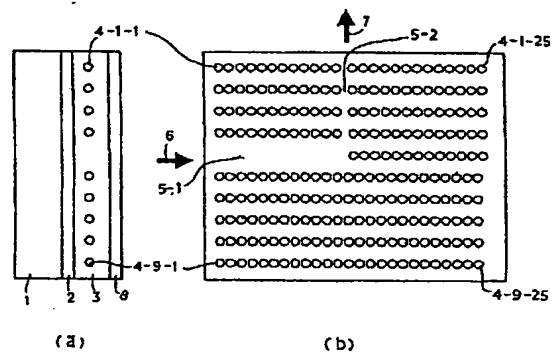
【図 4】



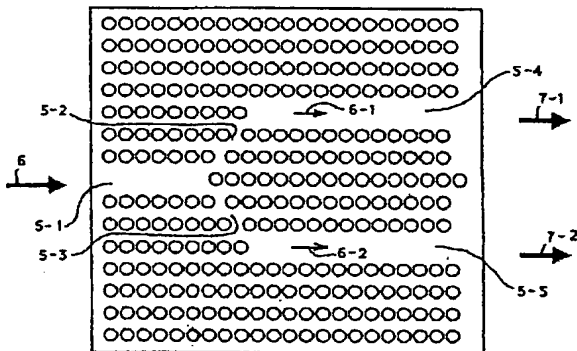
【図 5】



【図 6】



【図 7】



【図 8】

